

ные результаты свидетельствуют о возможности использования этой модели для прогнозирования поведения твердых частиц малого размера в турбулентных суспензионных потоках.

### Литература

- [1] Галкин С. В., Силаев М. А., Пыркин Ю. Г. Деп. ВИНТИ. № 6081-В88. М., 1986 [2] Пыркин Ю. Г., Галкин С. В., Силаев М. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1991. 32, № 1. С. 56. [3] Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М., 1981. [4] Murray S. P. // J. Geophys. Res. 1970. 75, № 9. P. 1647. [5] Hwang P. O. // J. Hydraulic Eng. 1985. 111, N 3. P. 485. [6] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М., 1986.

Поступила в редакцию  
13.02.92

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1993. Т. 34. № 2

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 669.863

### ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ СПЛАВОВ ГАДОЛИНИЙ — ДИСПРОЗИЙ В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

А. М. Тишин, О. А. Шипилов

(кафедра общей физики для естественных факультетов)

Проведено изучение модуля Юнга  $E$  и внутреннего трения  $Q^{-1}$  сплавов гадолиний—диспрозий в интервале температур 4,2—380 К. Установлено, что увеличение концентрации Gd приводит к сглаживанию максимума  $Q^{-1}$  в области существования ферромагнитного упорядочения при  $T \approx 37$  К. Построена магнитная фазовая диаграмма системы.

Изучение модулей Юнга  $E$  и внутреннего трения  $Q^{-1}$  в веществах, обладающих магнитной структурой, представляет значительный научный и технический интерес, поскольку, с одной стороны, данные величины крайне чувствительны к трансформации магнитного упорядочения, а с другой, — определяют степень пригодности материалов для различных технических устройств.

В работе [1] проведено экспериментальное исследование модуля Юнга и внутреннего трения в поликристаллах Dy различной чистоты. Обнаружено, что в области низких температур наблюдается гигантский максимум  $Q^{-1} \approx 2 \cdot 10^{-2}$ . Анализ экспериментальных данных позволил авторам работы [1] предположить, что данный максимум внутреннего трения может быть обусловлен следующими механизмами: 1) смещением под действием упругих напряжений границ доменов; 2) вращением векторов спонтанной намагниченности относительно осей легкого намагничивания в базисной плоскости.

Целью настоящей работы было получение дополнительной информации о данном низкотемпературном релаксационном процессе. В работе проведено исследование температурных зависимостей модуля Юнга  $E(T)$  и внутреннего трения  $Q^{-1}(T)$  высокочистых поликристаллических образцов сплавов  $Gd_xDy_{1-x}$  при  $x$ , изменяющемся в пределах от 0 до 1, в температурном диапазоне 4,2—380 К. Образцы были изготовлены в Институте металлургии им. А. А. Байкова методом дуговой плавки в инертной атмосфере. После плавления образцы подвергались отжигу при  $T = 700$  °С в течение 5 ч. Химический анализ образцов показал, что содержание газообразных примесей не превышает норму для дистиллированных образцов. Суммарное содержание металлических примесей не превышало 0,001 вес. %. Изгибные колебания консольно закрепленного образца возбуждались электростатическим образом и поддерживались с помощью электромегафонной обратной связи. Разрыв цепи обратной связи приводил к затуханию колебаний образца, число которых между двумя амплитудными порогами, определяемыми дискриминатором, подсчитывалось электронным счетчиком. Точность измерения  $Q^{-1}$  составляла 2—3 %. Более детальное описание методики эксперимента дано в [2].

Основное внимание в измерениях  $E$  и  $Q^{-1}$  уделялось особенностям поведения этих параметров в районе фазовых переходов ферромагнетизм (ФМ) — антиферромагнетизм (АФМ) при  $T=\Theta$ , и антиферромагнетизм — парамагнетизм (ПМ) при  $T=\Theta_2$ , а также в низкотемпературной области аномального поведения  $Q^{-1}$ . Измерения проводились при нагреве образцов от 4,2 до 380 К в отсутствие магнитного поля. Предварительно образцы медленно ( $\sim 2$  К/мин) охлаждались до температуры жидкого гелия.

На рис. 1 и 2 представлены температурные зависимости  $E(T)$  и  $Q^{-1}(T)$  для системы  $Gd_xDy_{1-x}$ . Частоты изгибных колебаний образцов при комнатной температуре составляли: для  $x=1$   $\nu=830$  Гц;  $x=0,7$   $\nu=1950$  Гц;  $x=0,6$   $\nu=1195$  Гц;  $x=0,5$   $\nu=1190$  Гц;  $x=0,25$   $\nu=2050$  Гц.

В парамагнитной области температур во всех образцах наблюдается дислокационный пик внутреннего трения типа Хасигути [1].

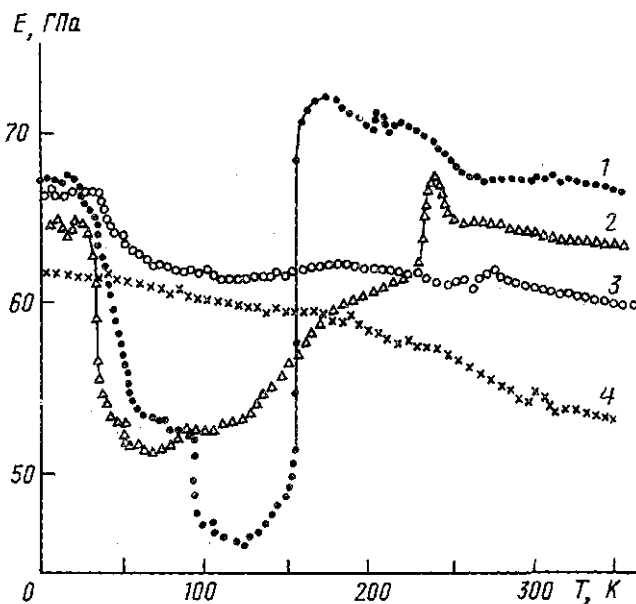


Рис. 1. Температурные зависимости модуля Юнга  $E$  поликристаллических сплавов  $Gd_xDy_{1-x}$ :  $x=0,25$  (1),  $0,5$  (2),  $0,7$  (3) и  $1$  (4)

Как видно из рисунков, в точке магнитного фазового перехода в ФМ-состояние в Gd при  $T=\Theta_c$  происходит незначительное увеличение модуля Юнга и наблюдается максимум внутреннего трения на фоне плавного роста величины  $Q^{-1}$  при повышении температуры. Необходимо отметить также аномальное поведение модуля Юнга и внутреннего трения в области спин-переориентационного перехода при  $T=T_{sr} \approx 220$  К, а также при  $T \approx 120$  К. Аномальное поведение модуля Юнга, внутреннего трения и начальной магнитной восприимчивости в окрестности второй температуры отмечалось ранее в работах [3, 4]. В [3] предполагается, что данные особенности связаны с изменением характера магнитного упорядочения гадолиния в данном температурном регионе.

В образцах с концентрацией гадолиния  $x < 0,5$  появляются дополнительные аномалии модуля Юнга и внутреннего трения, связанные с наличием в данной концентрационной области фазового перехода ФМ—АФМ. В окрестности этого перехода имеет место резкое уменьшение модуля Юнга и рост внутреннего трения.

На основе наших экспериментальных данных по  $E(T)$  и  $Q^{-1}(T)$  построена магнитная фазовая диаграмма системы, представленная на рис. 3. Как видно из рис. 3, полученная диаграмма достаточно хорошо совпадает с магнитными данными (см., напр., [5, 6]).

Рассмотрим более детально данные по  $E$  и  $Q^{-1}$  в ферромагнитной области при  $T < \Theta_1 = 90$  К. Модуль Юнга в данном температурном интервале вначале заметно

Рентгеновский анализ двойных интерметаллидов  $\text{ErMn}_2$  и  $\text{TbMn}_2$  показал, что они являются однофазными. Кристаллическая структура  $\text{ErMn}_2$  изотипна структуре фазы Лавеса  $\text{MgZn}_2$  (пр. гр.  $R\bar{6}_3/mmc-D_{6h}^4$ ). Элементарная ячейка содержит 12 атомов и имеет параметры:  $a=5,273\pm 0,005$  Å и  $c=8,632\pm 0,005$  Å;  $c/a=1,633$ , что соответствует идеальному отношению для гексагональных плотноупакованных структур. Кристаллическая структура интерметаллида  $\text{TbMn}_2$  изотипна структуре фазы Лавеса  $\text{MgCu}_2$  (пр. гр.  $Fd\bar{3}m-O_h^7$ ). Элементарная ячейка содержит 24 атома и имеет параметр  $a=7,620\pm 0,005$  Å. Каких-либо дополнительных максимумов на дифрактограммах интерметаллидов  $\text{ErMn}_2$  и  $\text{TbMn}_2$ , не относящихся к гексагональной или кубической фазам, не обнаружено.

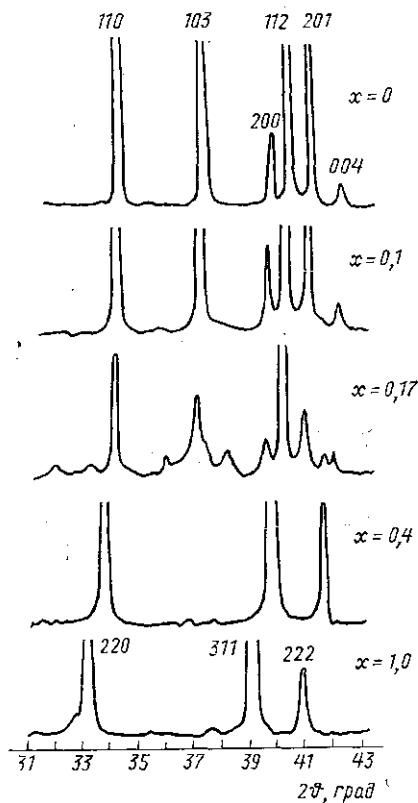


Рис. 1. Фрагменты дифрактограмм сплавов системы  $\text{Er}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2$

Анализ рентгеновских дифрактограмм сплавов системы  $\text{Er}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2$  (рис. 1) показал, что при изоморфном замещении 10% атомов эрбия атомами тербия ( $x=0,1$ ) структура и фазовый состав сплава не меняются, т. е. сплав остается рентгеновски однофазным и изоструктурным интерметаллиду  $\text{ErMn}_2$ .

На дифрактограммах сплава состава  $x=0,12$  присутствуют все максимумы, характерные для гексагональной структуры типа  $\text{C14}$ , но ширина и относительная интенсивность некоторых из них изменилась (максимумы 103, 200, 201 и др.). Подобная трансформация дифракционных картин обнаруживается и в сплавах системы  $\text{Er}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2$  составов  $x=0,17; 0,20$  и  $0,25$ .

Дифрактограммы сплавов составов  $0,3 \leq x \leq 0,8$  по числу, положению, ширине и относительной интенсивности максимумов полностью соответствуют дифрактограмме интерметаллида  $\text{TbMn}_2$ , т. е. эти сплавы рентгеновски однофазны и изоструктурны кубической фазе Лавеса  $\text{C15}$ .

Таким образом, из приведенного выше следует, что сплавы системы  $\text{Er}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2$  в области составов  $0 \leq x \leq 0,1$  обладают гексагональной структурой типа  $\text{C14}$ , а в области  $0,3 \leq x \leq 1,0$  — кубической типа  $\text{C15}$ . Сплавы в области промежуточных концентраций  $0,12 \leq x \leq 0,25$  можно рассматривать как двухфазные, состоящие из смеси фаз  $\text{C14}$  и  $\text{C15}$ .

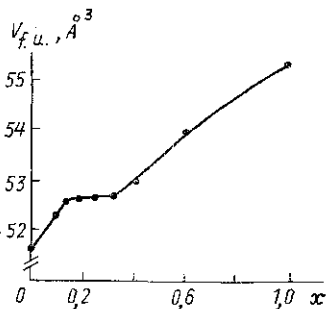


Рис. 2. Кривая концентрационной зависимости объема, приходящегося на формульную единицу, для сплавов системы  $\text{Er}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_2$

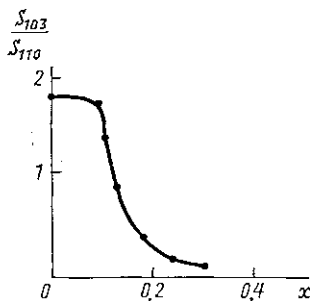


Рис. 3. Отношение интегральных интенсивностей для максимумов 103 и 110

Основное внимание в измерениях  $E$  и  $Q^{-1}$  уделялось особенностям поведения этих параметров в районе фазовых переходов ферромагнетизм (ФМ) — антиферромагнетизм (АФМ) при  $T=\Theta_1$  и антиферромагнетизм — парамагнетизм (ПМ) при  $T=\Theta_2$ , а также в низкотемпературной области аномального поведения  $Q^{-1}$ . Измерения проводились при нагреве образцов от 4,2 до 380 К в отсутствие магнитного поля. Предварительно образцы медленно ( $\sim 2$  К/мин) охлаждались до температуры жидкого гелия.

На рис. 1 и 2 представлены температурные зависимости  $E(T)$  и  $Q^{-1}(T)$  для системы  $Gd_xDy_{1-x}$ . Частоты изгибных колебаний образцов при комнатной температуре составляли: для  $x=1$   $\nu=830$  Гц;  $x=0,7$   $\nu=1950$  Гц;  $x=0,6$   $\nu=1195$  Гц;  $x=0,5$   $\nu=1190$  Гц;  $x=0,25$   $\nu=2050$  Гц.

В парамагнитной области температур во всех образцах наблюдается дислокационный пик внутреннего трения типа Хасигути [1].

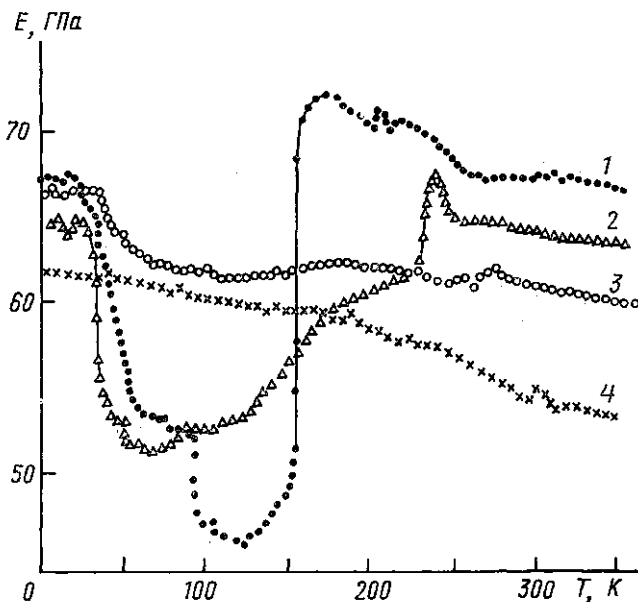


Рис. 1. Температурные зависимости модуля Юнга  $E$  поликристаллических сплавов  $Gd_xDy_{1-x}$ :  $x=0,25$  (1),  $0,5$  (2),  $0,7$  (3) и  $1$  (4)

Как видно из рисунков, в точке магнитного фазового перехода в ФМ-состояние в Gd при  $T=\Theta_c$  происходит незначительное увеличение модуля Юнга и наблюдается максимум внутреннего трения на фоне плавного роста величины  $Q^{-1}$  при повышении температуры. Необходимо отметить также аномальное поведение модуля Юнга и внутреннего трения в области спин-переориентационного перехода при  $T=T_{sr} \approx 220$  К, а также при  $T \approx 120$  К. Аномальное поведение модуля Юнга, внутреннего трения и начальной магнитной восприимчивости в окрестности второй температуры отмечалось ранее в работах [3, 4]. В [3] предполагается, что данные особенности связаны с изменением характера магнитного упорядочения гадолиния в данном температурном регионе.

В образцах с концентрацией гадолиния  $x \leq 0,5$  появляются дополнительные аномалии модуля Юнга и внутреннего трения, связанные с наличием в данной концентрационной области фазового перехода ФМ—АФМ. В окрестности этого перехода имеет место резкое уменьшение модуля Юнга и рост внутреннего трения.

На основе наших экспериментальных данных по  $E(T)$  и  $Q^{-1}(T)$  построена магнитная фазовая диаграмма системы, представленная на рис. 3. Как видно из рис. 3, полученная диаграмма достаточно хорошо совпадает с магнитными данными (см., напр., [5, 6]).

Рассмотрим более детально данные по  $E$  и  $Q^{-1}$  в ферромагнитной области при  $T < \Theta_1 = 90$  К. Модуль Юнга в данном температурном интервале вначале заметно

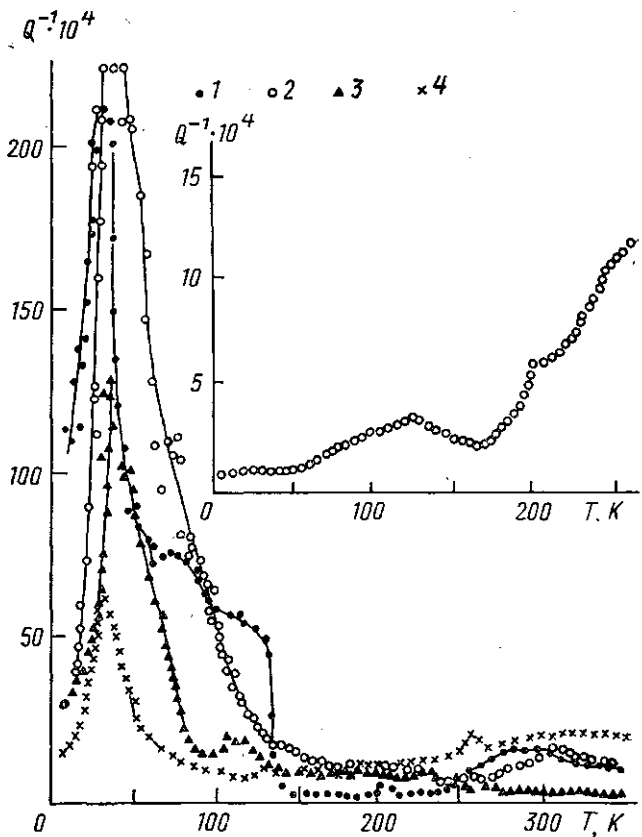


Рис. 2. Температурные зависимости внутреннего трения  $Q^{-1}$  поликристаллических сплавов  $Gd_2Dy_{1-x}$ :  $x=0,25$  (1), 0,5 (2), 0,6 (3) и 0,7 (4). На вставке —  $Q^{-1}$  для чистого Gd.

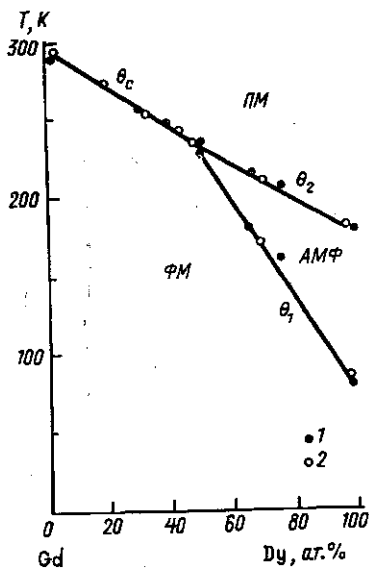


Рис. 3. Магнитная фазовая диаграмма системы сплавов  $Gd_2Dy_{1-x}$ : 1 — данные настоящей работы; 2 — данные работы [6].

возрастает, а затем при  $T \approx 15-30$  К выходит на константу. Причины подобного поведения кривых  $E(T)$  проанализированы в [1, 6]. Увеличение концентрации Gd приводит к уменьшению скачка модуля в точке  $\theta_1$ .

Из рис. 2 видно, что в окрестности температуры 40 К на кривых  $Q^{-1}$  наблюдается гигантский максимум. Установлено, что величина этого максимума сильно зависит от частоты измерения  $\nu$ . Поскольку вследствие различной зависимости  $\nu(T)$  частоты, на которых проводились измерения, в области низких температур отличались при изменении концентрации Gd, то проследить зависимость  $Q^{-1}$  от  $x$  представлялось возможным только на качественном уровне. Отметим, что максимум внутреннего трения при низких температурах в исследованных сплавах наблюдался даже при малой концентрации Dy, хотя величина пика  $Q^{-1}$  при этом сильно уменьшалась. Пик внутреннего трения практически не смещался по температуре и приблизительно соответствовал температуре 40 К. В чистом Gd этот максимум нами не обнаружен.

Таким образом, полученные результаты указывают на то, что данный максимум в основном связан с наличием в сплавах ионов Dy и может быть обусловлен вращением под действием упругих напряжений векторов спонтанной намагниченности относительно осей легкого намагничивания.

Авторы выражают благодарность О. Д. Чистякову за предоставление образцов для исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бурханов Г. С., Никитин С. А., Тишин А. М. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1993. 34, № 2. С. 46. [2] Шубин В. В. // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1986. [3] Никитин С. А., Спичкин Ю. И., Тишин А. М. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. 33, № 5. С. 88. [4] Бодряков В. Ю., Никитин С. А., Тишин А. М. // ФТТ. 1991. 33, № 7. С. 2233. [5] Никитин С. А. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов. М., 1989. [6] Левитин Р. З. // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1962.

Поступила в редакцию  
03.07.92

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1993. Т. 34, № 2

УДК 669.866.018:448.7

## МОРФОТРОПНЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В СПЛАВАХ КВАЗИБИНАРНОЙ СИСТЕМЫ $Eg_{1-x}Tb_xMn_2$

А. С. Илюшин, И. А. Никанорова, М. Аль-Дервиш\*), Ши Лей\*\*),  
Дзо Гуэнь\*\*)

(кафедра физики твердого тела)

Методом рентгеновской дифрактометрии изучен морфотропный фазовый переход в сплавах системы  $Eg_{1-x}Tb_xMn_2$ . Установлено, что при изоморфном замещении атомов эрбия атомами тербия структура С14 трансформируется в структуру С15 путем образования в гексагональной плотной упаковке дефектов двух типов.

В настоящей работе изучалось влияние изоморфного замещения атомов эрбия атомами тербия на стабильность гексагональной плотноупакованной фазы Лавеса С14 в квазибинарной интерметаллической системе  $Eg_{1-x}Tb_xMn_2$ .

Образцы для исследований выплавлялись из металлов чистотой 99,99% в индукционной печи в атмосфере аргона методом бестигельной плавки [1]. Все слитки переплавлялись по 3-4 раза, после чего запаивались в кварцевые ампулы, наполненные аргоном, и подвергались гомогенизирующему отжигу при 950 °С в течение двух недель. Образцы квазибинарной системы  $Eg_{1-x}Tb_xMn_2$  имели следующие составы по  $x$ : 0; 0,1; 0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,22; 0,25; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0.

Порошки для рентгеновского исследования получали путем растирания кусочков сплава в агатовой ступке под слоем этилового спирта. Рентгеновское исследование проводилось на дифрактометре ДРОН-1М в фильтрованном излучении от медного анода.

\*) Сирия.

\*\*) Китай.